

УДК 622.648.6

## ОЦЕНКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПНЕВМОУБОРОЧНЫХ СОПЛ

Кислов Н.В., Коваленок А.А. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

*Излагаются результаты исследования всасывающего и всасывающе-нагнетательного потоков у поверхности расстила измельченного торфа. Предлагаются обобщенные зависимости для определения длины активной зоны скорости воздуха перед входом в сопла и их поступательной скорости при заданном режиме работы пневмосистемы и в широком диапазоне состава и свойств торфа. Предлагается методика расчета режимов процесса пневмоуборки измельченного торфа из расстила и обосновываются условия рационального использования пневмоуборочной техники.*

### Введение

Применение пневматической уборки торфа относится к периоду возникновения поверхностно-послойного способа добычи фрезерного торфа. При пневмоуборке торфа, вследствие отсутствия подфрезеровывания торфяной залежи исключается увлажнение торфяной крошки. Регулирование скорости воздуха во входных отверстиях сопел и изменение поступательной скорости пневмоуборочной машины позволяет подобрать такой режим работы, при котором обеспечивается выборочная уборка частиц измельченного торфа определенной влажности и крупности. Фракционный состав торфа при пневмоуборке более однороден, в нем почти отсутствуют посторонние включения. Опыт эксплуатации пневмоуборочных машин различных модификаций показал, что энергоемкость процесса уборки измельченного торфа пневмоспособом значительно больше, а цикловые сборы меньше по сравнению с его механической уборкой. Эти недостатки обусловили поиск путей повышения эффективности использования энергии воздушного потока, прежде всего в зоне всасывания, так как значительная часть энергозатрат при пневмоуборке приходится на уборочные сопла [1].

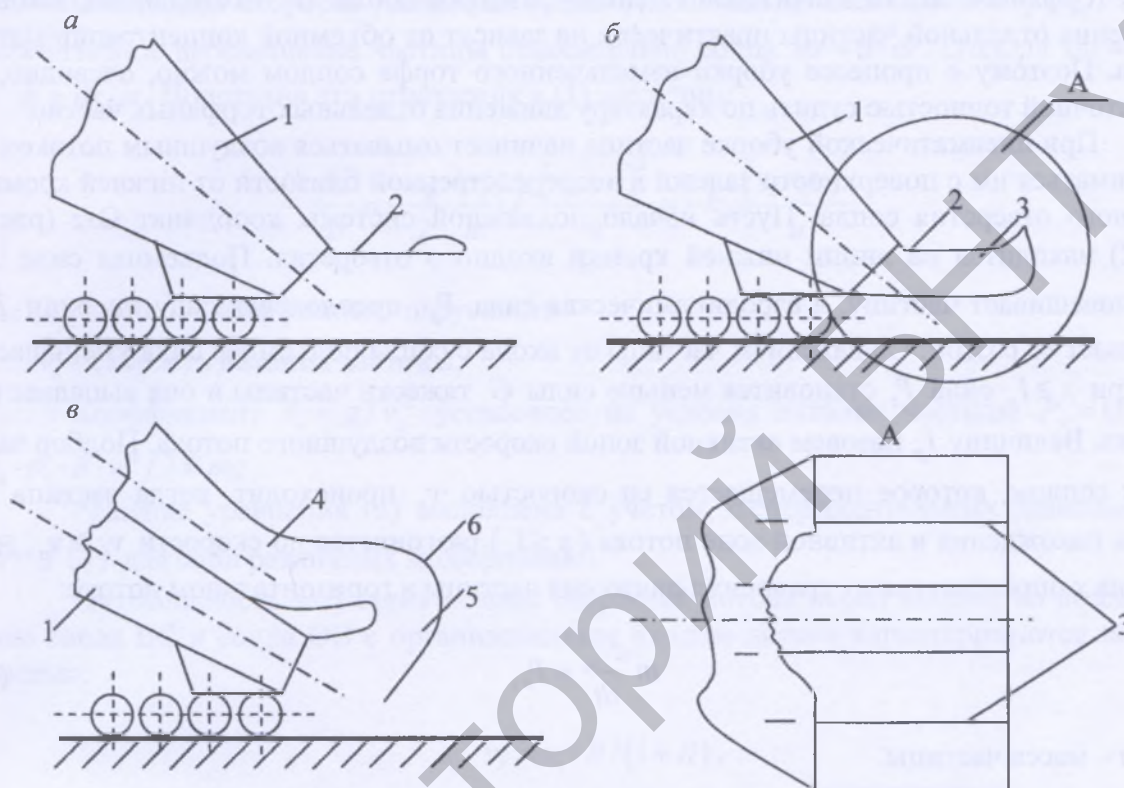
### Результаты исследования

Известно несколько модификаций пневмоуборочных сопел. Наиболее часто в самоходных и прицепных пневмоуборочных и пневмовалкующих машинах применялись всасывающие сопла (рисунок 1а), которые не обеспечивают требуемые цикловые сборы фрезерного торфа. Это привело к созданию ряда сопел, наиболее приемлемых с точки зрения уменьшения энергозатрат на уборку торфа и увеличения его сезонных сборов. Наиболее приемлемыми оказались сопла с организованным входом потока (рисунок 1б) [1] и всасывающе-нагнетательные сопла (рисунок 1в) [1, 2].

Всасывающее пневмоуборочное сопло ВС (рисунок 1а) представляет собой местный отсос с направляющим козырьком, образованный продолжением широкой стороны входного отверстия. Всасывающие факелы сопел ВС, устанавливаемых на машинах в один ряд, взаимодействуют между собой. Это приводит к уменьшению длины рабочей зоны всасывающего факела и завихрению потока в промежутках между соплами, что влечет за собой увеличение аэродинамического сопротивления всасывания и не-



равномерности концентраций торфовоздушной смеси по ширине сопл. Поэтому представлялось необходимым выровнять скорость потока перед входом во всасывающие отверстия сопл по их ширине. Это было достигнуто путем установки направляющих пластин под козырьками сопл непосредственно перед их входными отверстиями, то есть в зоне формирования всасывающего факела. Такое сопло названо соплом с организованным входом потока (рисунк 1б) [1].



1 – всасывающий канал; 2 – козырек; 3 – пластины направляющие;  
4 – нагнетательный канал; 5 – камера; 6 – коллектор

**Рисунок 1 – Пневмоуборочные сопла: а – всасывающее (ВС);  
б – с организованным входом потока (ОВ); в – всасывающе-нагнетательное (ВН)**

Интенсификация процесса пневматической уборки фрезерного торфа может быть достигнута не только улучшением условий всасывания перед входом в пассивные сопла (рисунк 1а и б), но и путем активизации расстила перед ними с помощью нагнетательного воздушного потока [3]. Отличительной особенностью такого сопла ВН (рисунк 1в) является то, что взаимодействие всасывающего и нагнетательного потоков происходит здесь в закрытой камере 5. Это сопло состоит из всасывающего канала 1 и нагнетательного 4. В канал 4 поступает примерно 80 % воздуха от общего расхода пневмосистемы, а остальная часть отводится в атмосферу. Затем по коллектору 6 воздух поступает к входному отверстию всасывающего канала 1, сдувая по пути частицы торфа, находящегося в расстиле. Боковые стенки коллектора плотно соприкасаются через эластичные элементы с поверхностью залежи. Наличие зазора между коллектором и залежью устраняется сгребанием им торфа и обеспечивает поступление определенного количества воздуха, что обеспечивает постоянный его расход в пневмосистеме рекультивации. При такой конструкции сопл решается не только задача использования нагнетательного потока для активизации расстила торфа, но и при созданных условиях движения воздуха в рабочей камере практически исключается пыление.

Качество пневматической уборки, производительность и энергетические показатели пневмоуборочных машин зависят от соотношения между скоростью  $v_x$  воздушного потока перед входом в сопло и поступательной скоростью  $v_n$  машины, а так же от размерно-плотностных и аэродинамических свойств убираемого торфа (рисунок 1).

Объемная концентрация торфа во время пневмоуборки достаточно мала, а размеры торфяных частиц значительно меньше размеров сопла. В этих условиях законы движения отдельной частицы практически не зависят от объемной концентрации материала. Поэтому о процессе уборки измельченного торфа соплом можно, очевидно, с достаточной точностью судить по характеру движения отдельных торфяных частиц.

При пневматической уборке частица начинает омываться воздушным потоком и подниматься им с поверхности залежи в непосредственной близости от нижней кромки входного отверстия сопла. Пусть начало подвижной системы координат  $Oxz$  (рисунок 2) находится на линии нижней кромки входного отверстия. Подъемная сила  $P_z$  уравнивает частицу, а аэродинамическая сила  $P_x$ , преодолевая силу инерции  $P_u$ , вызывает ее разгон. С удалением частицы от входа с сопла подъемная сила уменьшается. При  $x \geq l_p$  сила  $P_z$  становится меньше силы  $G$  тяжести частицы и она выпадает из потока. Величину  $l_p$  назовем активной зоной скорости воздушного потока. Подбор частицы соплом, которое перемещается со скоростью  $v_n$  происходит, когда частица за время нахождения в активной зоне потока ( $x \leq l_p$ ) разгоняется до скорости  $v_m \geq v_n$ . Величина  $x$  определяется из уравнения движения частицы в горизонтальном потоке:

$$m \frac{dv_m}{dt} = P_x, \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы.

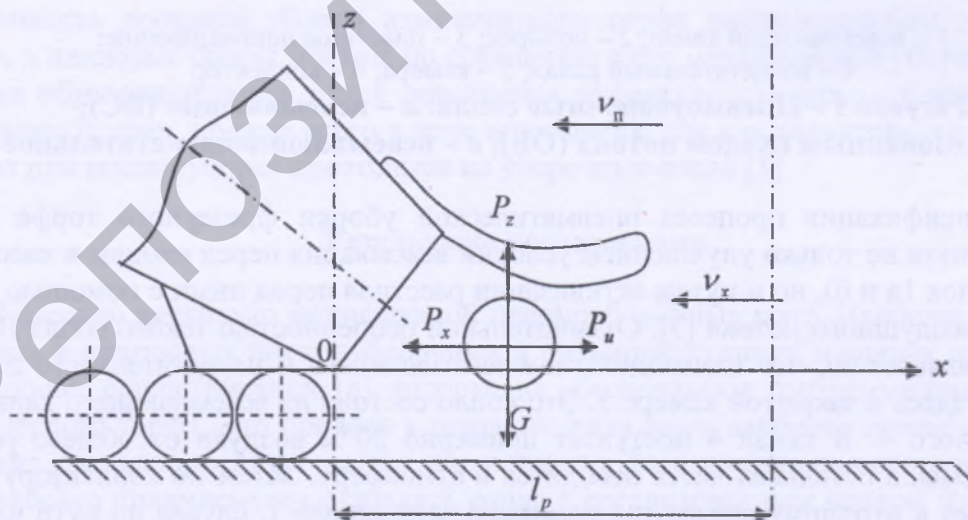


Рисунок 2 – Силы, действующие на частицу в воздушном потоке перед входом в сопло

Сила лобового сопротивления:

$$P_x = c_n \frac{\rho_a}{2} F v_{\text{м}}^2, \quad (2)$$



где  $c_n$  – коэффициент лобового сопротивления;

$\rho_b$  – плотность воздуха;

$F$  – площадь миделевого сечения;

$v_{\text{гн}} = v_x + v_n - v_m$  – горизонтальная составляющая скорости частицы относительно потока.

Обозначим скорость движения сопла относительно частицы  $u = v_n - v_m$ . Тогда элементарное перемещение частицы относительно сопла  $dx = u \cdot dt$ . Отсюда  $du = -dv_m$  и  $dt = dx/u$ . Подставив эти отношения в (1), получим:

$$\frac{du}{dx} = -\frac{c_n}{2} \cdot \frac{\rho_b}{m} \cdot F \frac{(v_x + u)^2}{u} = -k_p \frac{(v_x + u)^2}{u}, \quad (3)$$

где  $k_p = g/v_s^2$  – коэффициент парусности;

$v_b$  – скорость витания частицы;

Коэффициент  $k_p = g/v_s^2$  установлен из условия витания частицы  $P_z = G$ , т.е.  $c_n \cdot \rho_b \cdot F \cdot v_s^2 / 2 = mg$ .

Решение уравнения (3) выполнено с учетом экспериментальных зависимостей  $v_x = f(x)$  для сопл различных модификаций.

Интенсивность затухания осевых скоростей потока перед входом во всасывающие сопла ВС и сопла ОВ с организованным входом потока характеризуются зависимостью:

$$v_x = v_c \cdot B / (1 + B), \quad (4)$$

где  $v_c$  – средняя скорость потока во входном отверстии сопла, гидравлический радиус которого  $R_r$ ;  $B = a \cdot e^m (x/R_r)^{n_2}$ ;

$a$ ,  $m$ ,  $n_2$  – обобщенные параметры формулы, величина которых определяется длиной  $l$  козырька, углом  $\beta$  в радианах наклона оси входной части сопла и размерами входного отверстия [1].

Осевая скорость  $v_x$  в рабочей камере всасывающе-нагнетательного сопла ВН при угле наклона оси нагнетательного канала  $\alpha = 10^\circ - 30^\circ$  подчиняется закономерности:

$$v_x = v_c (1 - 13,2 \cdot x^2). \quad (5)$$

Комбинированная модель (3) применена для обоснования поступательной скорости  $v_n$  сопл различных модификаций и величины  $l_p$  активной зоны всасывания, в которой частицы, перемещаясь на расстояние  $x \leq l_p$ , разгоняются до скорости  $v_m \geq v_n$ . При этом учитывалось, что скорость  $v_{xp}$ , при которой частицы с  $v_s = 7-30$  м/с не уравниваются аэродинамической подъемной силой, изменяется в соответствии с закономерностью  $v_{xp} = v_{1p} \cdot (v_s/v_{1s})^{0,5}$ , где  $v_{1p} = 1,65$  м/с – скорость воздуха перед входом в сопло, при которой частицы с  $v_s = v_{1s} = 1$  м/с выпадают из всасывающего потока ( $v_m = 0$ ).

Обобщенная зависимость  $l_p = f(L, R_r, \beta, v_s, v_c)$  для определения величины  $l_p$  активной зоны перед входом во всасывающие сопла различных модификаций при скольжении их по поверхности расстила имеет вид:

$$l_p = a^{1/n_2} \cdot e^{m/n_2} \left( (v_c / v_{xp}) - 1 \right)^{1/n_2} \cdot R_r. \quad (6)$$

В случае применения системы обычных всасывающих сопел (BC+BC) и сопел с организованным входом потока (ОВ):

$$l_p = a_1 \left( (v_c / v_{xp}) - 1 \right)^{0,4} \cdot R_r. \quad (7)$$

Здесь для сопел ОВ  $a_1 = 6,3$ , а для системы BC+BC  $a_1 = 3,7$ , т.е. при одинаковых условиях всасывания длина активной зоны перед входом в сопла с организованным входом в 1,7 раза больше, чем у обычных.

Длина активной зоны рабочей камеры всасывающе-нагнетательного сопла:

$$l_p = 0,275 \cdot \left( 1 - (v_{xp} / v_s) \right)^{0,5}. \quad (8)$$

В этом случае для широкого диапазона изменения аэродинамических свойств измельченного торфа ( $v_s = 7-30$  м/с)  $l_p$  на 10-40 % больше, чем у сопел ОВ, и в 1,8-2,4 раза увеличивается по сравнению с системой сопел BC+BC.

В результате аналитического и экспериментального исследований установлено, что для каждой из модификаций сопел и  $v_n = \text{const}$  отношение наибольшей поступательной скорости  $v_{n\max}$ , при которой  $v_m = 0$ , к средней скорости  $v_c$  всасывания остается практически постоянным. Причем рабочая камера сопла ВН по мере возрастания его поступательной скорости  $v_n$  обеспечивает пропорциональное увеличение удалений частиц от входного отверстия всасывающего канала, в то время как интенсивность приращения функции  $l = f(v_n)$  для сопел BC и ОВ с увеличением  $v_n$  постоянно нарастает (рисунок 3). Последнее приводит к тому, что аналогичные по свойствам частицы выпадают из всасывающего потока этих сопел при значительно меньших поступательных скоростях  $v_n$ . Для определения наибольшей поступательной скорости сопел рекомендуется формула:

$$v_{n\max} = k_{\text{соп}} \cdot v_{n1} \cdot v_c / v_s, \quad (9)$$

где  $k_{\text{соп}} = 1-1,5$  – коэффициент, учитывающий модификацию сопла;  $v_{n1} = 0,67$  м/с – параметр, характеризующий предельную поступательную скорость для случая  $v = v_s$ .

Энергоемкость пневматической уборки в основном определяется скоростью  $v_c$  воздуха во всасывающем отверстии сопла. Поэтому сравним скорость  $v_c$  сопла ВН со скоростями  $v_c$ , которым соответствуют предельные значения  $l_p$  и  $v_{n\max}$  для сопел BC, BC+BC и ОВ. Если для последнего сопла принять  $v_c = 32,5$  м/с, то при  $v_c = 10,4$  м/с  $l_p = 0,217$  м и  $v_{n\max} = 2,61$  м/с. Аналогичные значения  $l_p$  и  $v_{n\max}$  для сопел ВН получаются при  $v_c = 15$  м/с. Эта же величина  $l_p$  для системы всасывающих сопел пневмоком-

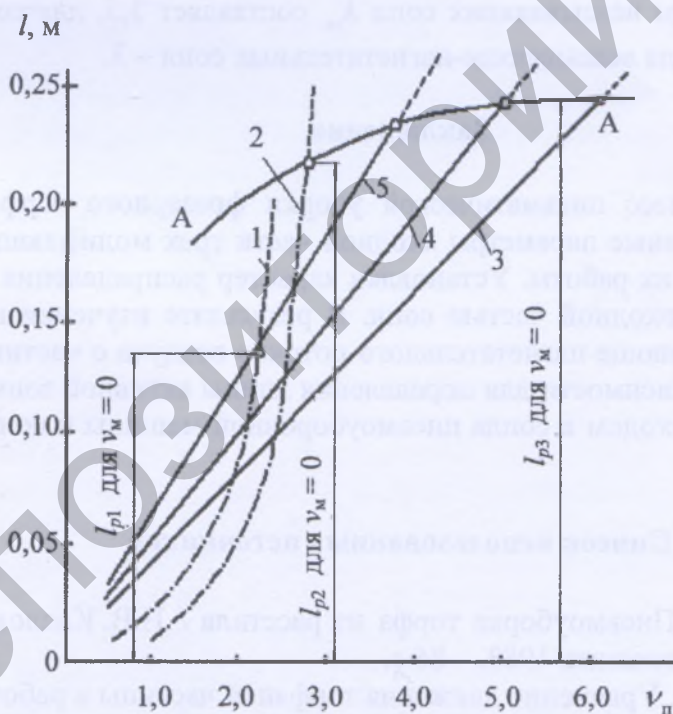


байна может быть получена только при  $v_c = 100$  м/с, что с практической точки зрения нецелесообразно. Для одиночного сопла это значение  $l_p$  получается уже при  $v_c = 40$  м/с, т.е. в 2,5 раза меньше, чем для системы сопл ВС+ВС. Это значение скорости  $v_c$  было принято для обоснования режимов работы серийных пневмоуборочных машин, что явилось причиной их низкой производительности и значительной энергоёмкости.

В производственных условиях для обоснования поступательной скорости  $v_n$  пневмоуборочных машин с соплами различных модификаций следует исходить из приведенной скорости витания смеси частиц измельченного торфа. Тогда скорость  $v_n$  составляет примерно 0,6-0,7 от наибольшей допустимой поступательной скорости сопла и характеризуется зависимостью:

$$v_n = k_{\text{соп}} \cdot v_c / v_{\text{сп}}. \quad (10)$$

Здесь для системы всасывающих сопл (ВС+ВС)  $k_{\text{соп}} = 0,4-0,47$ , для сопла с организованным входом потока (ОВ)  $k_{\text{соп}} = 0,48-0,56$  и для всасывающе-нагнетательных сопл (ВН)  $k_{\text{соп}} = 0,6-0,7$ .



- 1 — для системы всасывающих сопл пневмоуборочной машины ( $v_s = 10,4$  м/с;  $v_c = 32,5$  м/с);  
 2 — для сопла с организованным входом потока ( $v_s = 10,4$  м/с;  $v_c = 32,5$  м/с);  
 3-5 — для всасывающе-нагнетательного сопла при  $v_s = 10$  м/с  
 (3 —  $v_c = 30$  м/с; 4 —  $v_c = 25$  м/с; 5 —  $v_c = 19,5$  м/с)

Рисунок 3 — Удаления  $l$  частиц от входа в сопла различных модификаций в зависимости от поступательной скорости  $v_n$

Производственные испытания и эксплуатация показали, что применение сопел с организованным входом потока и всасывающе-нагнетательных сопел для интенсификации процесса пневмоуборки позволяет наряду с увеличением поступательной скорости машин значительно снизить скорость всасывания потока. Так, если во входных отверстиях всасывающих сопел пневмоуборочных машин скорость воздуха  $v_c = 40-42$  м/с, то для получения тех же цикловых сборов торфа с помощью сопел с организованным входом потока достаточно обеспечить  $v_c = 36$  м/с, а в системе с рециркуляцией воздушно-го потока  $v_c$  можно уменьшить до 32-34 м/с. При одной и той же скорости всасывания сопла с организованным входом потока и всасывающе-нагнетательные сопла обеспечивают те же цикловые сборы, что и всасывающие сопла, на более высоких поступательных скоростях машин ( $v_n = 2-2,5$  м/с). Таким образом, применение сопел с организованным входом потока и всасывающе-нагнетательных сопел обеспечивает интенсификацию процесса пневматической уборки торфа и снижение энергозатрат.

Приведенные результаты позволяют записать соотношение для определения расчетной скорости воздуха во входных отверстиях сопел

$$v_c = k_{вс} \cdot v_{сп} \quad (11)$$

Здесь для системы всасывающих сопел  $k_{вс}$  составляет 3,5, для сопел с организованным входом – 3,2 и для всасывающе-нагнетательных сопел – 3.

### Заключение

Исследован процесс пневматической уборки фрезерного торфа из расстила, обоснованы конструктивные параметры входной части трех модификаций пневмоуборочных сопел и режимы их работы. Установлен характер распределения скоростей воздушного потока перед входной частью сопел. В результате изучения взаимодействия всасывающего и всасывающе-нагнетательного потоков воздуха с частицами торфа получены обобщенные зависимости для определения длины активной зоны скорости воздушного потока перед входом в сопла пневмоуборочной машины и ее поступательной скорости.

### Список использованных источников

1. Кислов, Н.В. Пневмоуборка торфа из расстила / Н.В. Кислов, В.Н. Бакшанский. – Минск: Наука и техника, 1983. – 86 с.
2. Давыдов, Л.Р. Уравнение движения торфяной частицы в рабочей камере всасывающе-нагнетательного сопла / Л.Р. Давыдов, Н.В. Кислов // Сб. науч. тр. / Вышэйшая школа. – Минск, 1978. – Вып. 8: Машины и технология торфяного производства. – С. 32-37.
3. А.с. 261365 (СССР) Сопло к пневматической торфоуборочной машине / А.Б. Горенштейн. – Оpubл. В Б.Н., 1970, № 5.



Kislov N.V., Kovalenok A.A.

### Estimation of pneumatic nozzles operating conditions

*The research results of suction and suction and force streams at the spreading surface of the milled peat are represented. The generalized dependences for determination of active zone length of air speed before entrance into the nozzles and its travelling speed at the specified operating conditions of the pneumatic system and wide composition range and qualities of peat are proposed. The calculation procedure of pneumatic harvest methods of the milled peat from the peat spread is proposed, as well as the conditions for rational utilization of pneumatic harvesting equipment are substantiated.*

Поступила в редакцию 27.04.2011 г.